

УДК 621.777.4

АЛИЕВ И.С., докт. техн. наук, проф., ДГМА, г. Краматорск
ГРУДКИНА Н.С., аспирант, ДГМА, г. Краматорск
МАРТЫНОВ С.В., ассистент, ДГМА, г. Краматорск

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНО - ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Проведен теоретический анализ процесса радиально - обратного выдавливания полых деталей с фланцем энергетическим методом верхней оценки. Получены зависимости кинематических характеристик от геометрических параметров детали. Проведен сравнительный анализ поэтапного формоизменения, полученный на основе предложенной расчётной схемы и программного продукта *Qform 2D*.

Ключевые слова : выдавливание, фланец, метод верхней оценки, *Qform 2D*

Проведено теоретичний аналіз процесу радіально - зворотного видавлювання порожніх деталей із фланцем енергетичним методом верхньої оцінки. Отримано залежності кінематичних характеристик від геометричних параметрів деталі. Проведено порівняльний аналіз поетапної формозміни, отриманий на основі запропонованої розрахункової схеми й програмного продукту *Qform 2D*.

Ключові слова: видавлювання, фланець, метод верхньої оцінки, *Qform 2D*

The theoretical analysis of the radial - reverse extrusion of hollow parts with a flange by energy method of upper bound is made. The dependences of the kinematic characteristics of the geometric parameters of the details is obtained. A comparative analysis of the phase-forming, obtained on the proposed design scheme and software *Qform 2D*.

Key words: extrusion, flange, method of upper bound, *Qform 2D*

Обеспечение конкурентоспособности продукции машиностроения в современных условиях связано прежде всего с разработкой и освоением новых технологий, позволяющих получить изделия высокого качества при минимальных материальных, трудовых и энергетических затратах на их производство. В связи с этим возрастает роль эффективных ресурсосберегающих методов обработки металлов давлением, среди которых видное место занимает холодная объёмная штамповка. Комбинирование схем обратного и радиального выдавливания при изготовлении деталей с фланцем повышает технологические возможности процессов штамповки, однако сопряжено с недостаточным освещением в литературе исследований как силового режима, так и конечного формоизменения детали. Одним из эффективных методов исследования процессов комбинированного выдавливания является энергетический метод, в котором ключевое значение имеет подбор подходящих функций, описывающих кинематически возможное поле скоростей (КВПС), удовлетворяющее граничным условиям, условию несжимаемости материала и условию неразрывности нормальных компонент скорости [1,2]. Следует отметить, что применение метода кинематических элементов позволяет описать сложные схемы течения при помощи эле-

ментарных модулей (в основном используют прямоугольные, треугольные и криволинейные модули) [2 - 4].

Целью данной работы является проведение теоретического анализа процесса комбинированного радиально - обратного выдавливания полых деталей с фланцем энергетическим методом верхней оценки (ЭМВО), а также анализ поэтапного формоизменения получаемых детали на основе предложенной расчётной схемы.

Расчётная схема процесса выбрана исходя из данных по изучению деформированного состояния при комбинированном радиально - обратном выдавливании (рис.1).

В объёме деформируемой заготовки можно выделить ряд кинематических элементов, внутри которых течение металла приблизительно равномерно. При этом зоны 1 и 2 являются цилиндрическими, зоны 3 и 4 – кольцевыми, осевое сечение зон 5 и 6 представляет собой прямоугольные трапеции, ограниченные прямой $z(r) = \frac{h-H+h^*}{R_2-R_1} \cdot (r-R_2) + h+h^*$ с параметром $p = h^*$, где $h^* \in (0, H-h)$. В таблице 1 приведены КВПС для каждой из зон, используя следующие обозначения для скоростных параметров:

$$\mathcal{G}_1 = \frac{\mathcal{G}_0 \cdot (1-\lambda) \cdot R_1}{2 \cdot (H-h)}, \quad w^* = \frac{2 \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot (H-h)}{R_2^2 - R_1^2}, \quad k = \frac{h-H+h^*}{R_2-R_1}, \quad f(r) = \frac{a}{r} + b.$$

Таблица 1

КВПС схемы процесса осесимметричного комбинированного выдавливания

№ модуля	\mathcal{G}_z	\mathcal{G}_r
1.	$\frac{\mathcal{G}_0 \cdot (\lambda-1)}{H-h} \cdot (z-H) - \mathcal{G}_0$	$\frac{\mathcal{G}_0 \cdot (1-\lambda) \cdot r}{2 \cdot (H-h)}$
2.	$-\frac{\lambda}{h} \cdot \mathcal{G}_0 \cdot z$	$\frac{\lambda}{2h} \cdot \mathcal{G}_0 \cdot r$
5.	$\frac{\frac{w^*}{z(r)-h} \cdot (z-h) - f(r) + \frac{2 \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot (H-h) - w^* \cdot (r^2 - R_1^2)}{2 \cdot r \cdot (z(r)-h)^2}}{(z-h) \cdot k}$	$\frac{w^* \cdot (R_1^2 - r^2) + 2 \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot (H-h)}{2 \cdot r \cdot (z(r)-h)}$
3.	$-\frac{f(r)}{h} \cdot z$	$\frac{\lambda \cdot \mathcal{G}_0 \cdot R_1^2 + 2a \cdot (r-R_1) + b \cdot (r^2 - R_1^2)}{2 \cdot r \cdot h}$
4.	0	$\frac{\lambda \cdot \mathcal{G}_0 \cdot R_1^2 + 2a \cdot (R_2 - R_1) + b \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{2 \cdot r \cdot h}$
6.	$w^* - f(r)$	0

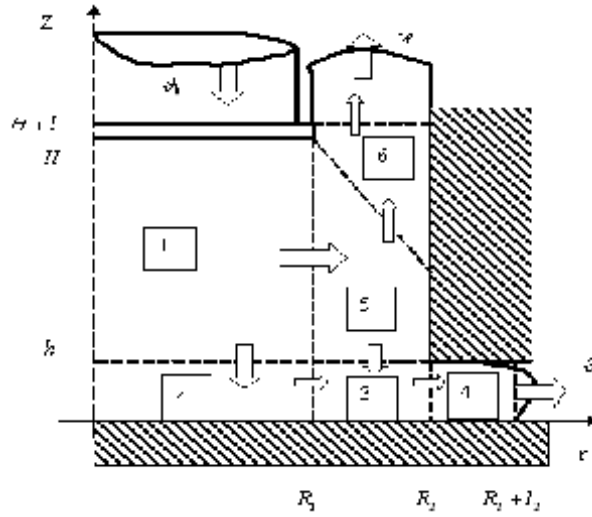


Рис.1. Схема процесса осесимметричного комбинированного выдавливания.

Значение мощностей сил деформирования, среза (сдвига) и трения подставляем в уравнение энергетического баланса [1] и получаем:

$$N_a = \sigma_s \cdot \left(\begin{aligned} & \vartheta_0 \cdot \pi \cdot R_1^2 + \iint_{V_5} \dot{\varepsilon}_{15} dV_5 + 2 \cdot \pi \cdot \frac{\left| \lambda \cdot \vartheta_0 \cdot R_1^2 + 2a \cdot (R_2 - R_1) + b \cdot (R_2^2 - R_1^2) \right|}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + \\ & \frac{2 \cdot \pi \cdot \left| d \int_{R_1}^{R_2} \frac{H+l-z(r)}{r} dr + \iint_{V_3} \dot{\varepsilon}_{13} dV_3 + \pi \cdot R_1 \cdot (H-h) \right| \left| w^* + v_1 \cdot k + \vartheta_0 \cdot (1+\lambda) - 2 \cdot \left(\frac{a}{R_1} + b \right) \right|}{\sqrt{3}} + \\ & + \pi \cdot \vartheta_0 \cdot \frac{R_1^3 \cdot \left| h \cdot (1+\lambda) - 2\lambda \cdot H \right|}{3\sqrt{3} \cdot h \cdot (H-h)} + \iint_{G_{5-3}} [\vartheta_{r5} - \vartheta_{r3}] \cdot \sqrt{1+[z'(r)]^2} dG_{5-3} + \pi \cdot h \cdot \frac{|a+bR_2|}{\sqrt{3}} + \\ & + \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{3}} \int_{R_1}^{R_2} |\vartheta_{r5} - \vartheta_{r3}| \cdot r dr + \frac{2 \cdot \mu_s \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \vartheta_0 \cdot R_1^3}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot h} + \frac{4 \cdot \mu_s \cdot \pi \cdot R_1}{\sqrt{3}} (h_x + l_1) \left| \vartheta_0 + w^* - \left(\frac{a}{R_1} + b \right) \right| + \\ & + \frac{2 \cdot \mu_s \pi (R_2 - R_1)}{\sqrt{3} \cdot h} \left| \lambda \vartheta_0 R_1^2 + a \cdot (R_2^2 - R_1^2) + b \cdot \frac{R_2^2 + R_1 R_2 - 2R_1^2}{3} \right| + 4\pi \cdot R_2 \cdot \frac{\mu_s}{\sqrt{3}} \int_h^{h+h^*} \vartheta_{z5} \downarrow_{r=R_2} dz + \\ & + \frac{4 \cdot \mu_s \pi R_2}{\sqrt{3}} (H+l_1-h-h^*) \left| w^* - \left(\frac{a}{R_2} + b \right) \right| \end{aligned} \right)$$

Для вычисления приведенного давления деформирования ($\bar{p} = p/\sigma_s$) используем формулу:

$$\bar{p} = \frac{\sum N_i}{\vartheta_0 F \sigma_s} = \frac{\sum N_i}{\vartheta_0 \cdot \pi \cdot R_1^2 \cdot \sigma_s}.$$

В связи со сложностями интегрирования некоторых составляющих выражения приведенного давления используем численные методы пакета MAPLE 9. Для удобства обработки результатов расчёта все геометрические параметры процесса выражены в долях от R_1 . Варьируемыми при минимизации величины \bar{p} является геометрический параметр $h^* \in (0, H-h)$, определяющий положение кривой $z=z(r)$ и скорость истечения металла в вертикальном направлении $\lambda \cdot \vartheta_0$ и $w^* = f(r)$, где $\lambda \in [0,1]$. Функция $f(r) = \frac{a}{r} + b$ является неотрицательной и убывающей при $r \in [R_1, R_2]$, опи-

сывающей возможность затягивания некоторого объёма металла пуансоном в направлении хода в начальной стадии процесса, что позволяет более полно отразить процесс формоизменения детали. Сравнительный результат исследования скоростей выхода $w = w^* - f(r)$ в вертикальном направлении в зависимости от начальной высоты заготовки \bar{H}_0 , высоты фланца h и толщины стенки стакана представлены на рис.2.

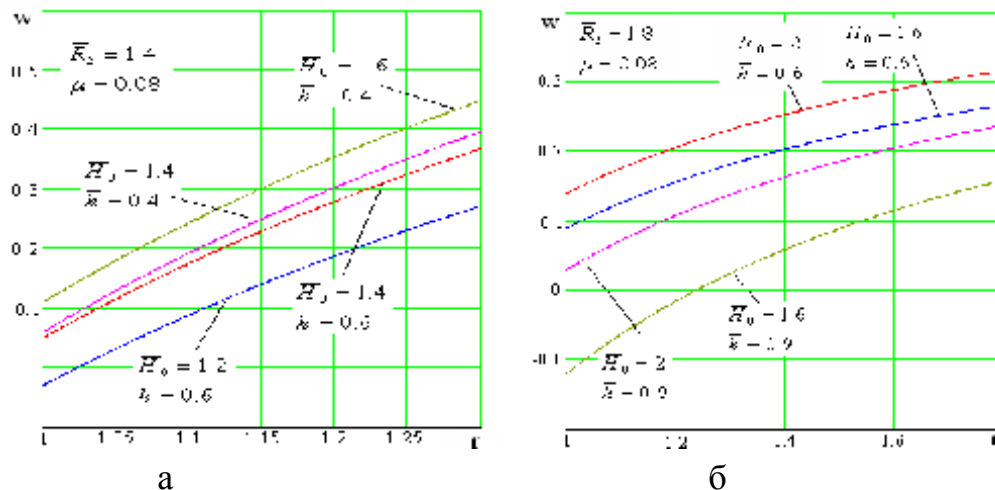


Рис.2. Зависимости скорости выхода w от геометрических параметров процесса.

При уменьшении начальной высоты заготовки \bar{H}_0 скорость выхода металла $w = w^* - f(r)$ в вертикальном направлении уменьшается, при чём при достаточно небольшой высоте фланца h является положительной по всей толщине стенки стакана при $r \in [R_1, R_2]$. Следует отметить также, что увеличению h для относительно невысоких заготовок приводит также к уменьшению $w = w^* - f(r)$, причём данная функция может описывать возможность затягивания некоторого объёма металла пуансоном в направлении хода в зоне контакта при $r \rightarrow R_1$ в начальной стадии процесса (см. рис.2, б, при $\bar{H}_0 = 1.6$, $\bar{h} = 0.9$). Для дальнейшего описания процесса формоизменения величина $w = w^* - f(r)$ может быть заменена на $w_2 = const$ [3], что приведёт к соответствующим изменениям в КВПС схемы.

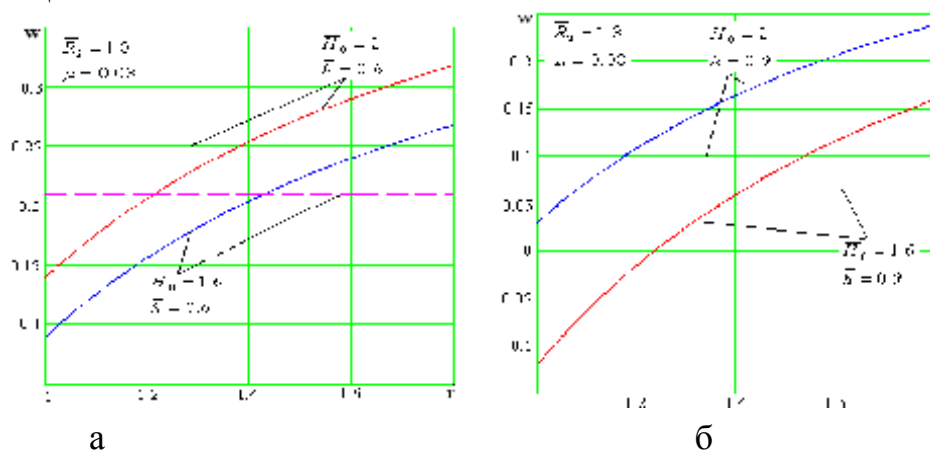


Рис.3. Сравнительный анализ скоростей выхода w при $w = w^* - f(r)$ и $w_2 = const$.

Графики зависимостей скорости выхода металла в вертикальном направлении для расчётных схем при $w = w^* - f(r)$ и $w_2 = const$ при относительно небольших

значениях параметров \bar{h} и \bar{R}_2 для невысоких заготовок сохраняют знак и являются сопоставимыми (рис.3, а). Увеличение величины \bar{R}_2 и высоты фланца \bar{h} приводит к более значительному расхождению результатов и увеличению разрыва значений $w = w^* - f(r)$ и $w_2 = const$ на протяжении толщины стенки стакана. Изменение величины трения μ_s практически не влияет на характер связи данных величин скоростей выхода металла в вертикальном направлении.

Данные, полученные на основе предложенной расчётной схемы и программного продукта *Qform 2D* имеют хорошую сходимость. В начальной стадии наблюдается расхождение в направлении движения металла в стенку стакана, что можно отнести к погрешности численного интегрирования. В дальнейшем картина поэтапного изменения, полученная с помощью *Qform 2D* и ЭМВО по предложенной расчётной схеме выравнивается (при величине хода $h_x > 7$ мм. погрешность составляет не более 10%).

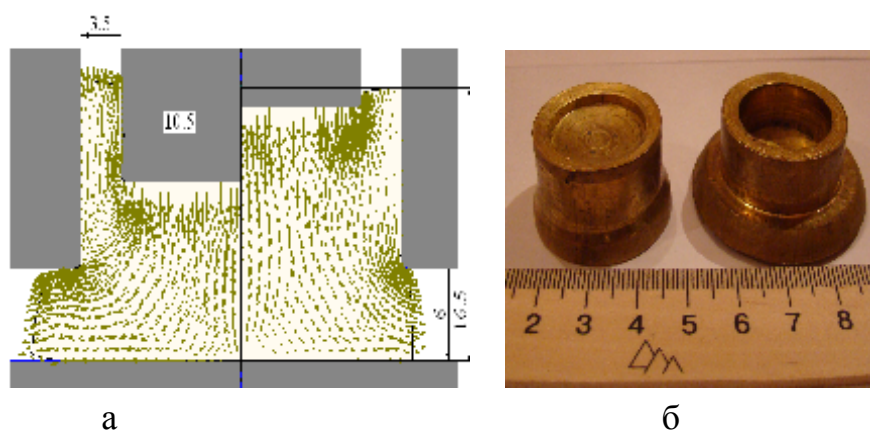


Рис.4. Направления течения металла в стенку стакана при поэтапном формоизменении, полученные с помощью *Qform 2D* (а), поэтапное формоизменение детали с фланцем из материала Л62 (б).

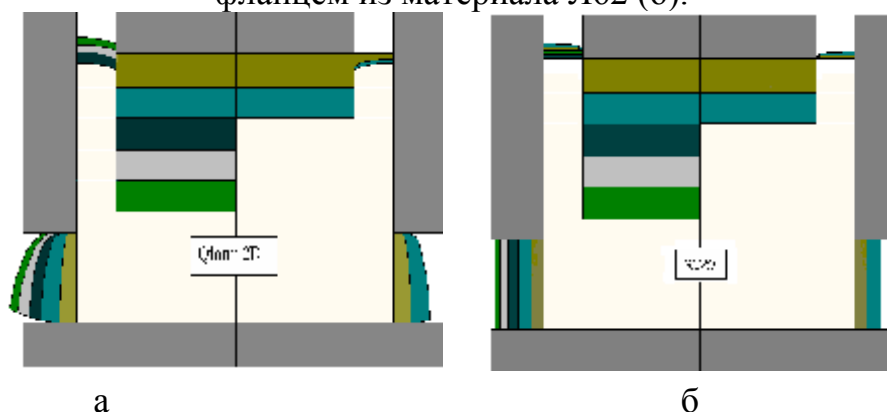


Рис.5. Поэтапное формоизменение детали, полученное с помощью *Qform 2D* (а) и ЭМВО на основе предложенной схемы (б).

Таким образом, при разработке процесса радиально-обратного выдавливания для относительно невысоких заготовок ($H/R_2 < 2$) в качестве расчётной целесообразно использовать предложенную схему деформирования, включающую в себя функцию скорости выхода $w = w^* - f(r)$ (в начальной стадии процесса). В результате оптимизации возможно определение зависимостей кинематических характеристик от геометрических параметров детали, а также прогнозирование формоизменения дета-

ли по ходу процесса, более полно отражающего неравномерность выхода металла в стенку стакана (погрешность не превышает 10 % при величине хода $h_x > 7$ мм.).

Список литературы: 1. Алиев И.С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания // Кузнечно – штамповочное производство. -1990. - №2. – С. 7 – 9. 2. Алиев И.С., Солодун Е.М., Крюгер К. Моделирование процессов комбинированного выдавливания // Механика деформированного твёрдого тела и обработка металлов давлением. Сборник научных трудов. – Тульский гос. унив-т. Тула, 2000, С.21-27. 3. Алиев И.С., Грудкина Н.С. Теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания.//Обработка металлов давлением. Сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2008.-№1(19) - С.55-60. 4. Алиев И. С. Определение сил раскрытия оправки при радиальном выдавливании внутренних фланцев/ И.С. Алиев, Н.С. Грудкина, С.В. Мартынов // Обработка материалов давлением: сб. науч. пр. - Краматорськ: ДДМА. - 2009. - № 1 (20). - С. 30-35. - Библиогр.: с. 35. - ISBN 978-966-379-325-2.

УДК 621.777.4

ВАСИЛЬЕВ К.И., СОЛОВЬЕВ М.В., ШАРАПОВ К.М.

Кафедра «Системы пластического деформирования» МГТУ «СТАНКИН»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОТКРЫТОЙ ОСАДКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИНЫ НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Экспериментальными исследованиями показано формирование «осадочного креста» и объяснены причины его возникновения. Показано, что можно связать между собой характеристики материала, полученные при испытании на разрыв, и величину предельно-допустимой осевой деформации. Полученные зависимости позволяют прогнозировать получение предельных геометрических размеров поковок без проведения дополнительных испытаний на осадку.

Традиционно принято считать, что бочкообразная форма при осадке цилиндрической заготовки объясняется наличием сил контактного трения между плитами и деформируемой заготовкой. В настоящей работе предлагается несколько иное объяснение неравномерности деформации при осадке.

После травления стальных осажённых заготовок в их поперечном сечении выявляется «осадочный крест», границы которого являются линиями интенсивных сдвиговых деформаций – линиями разрыва скоростей [1,2] (рис. 1).

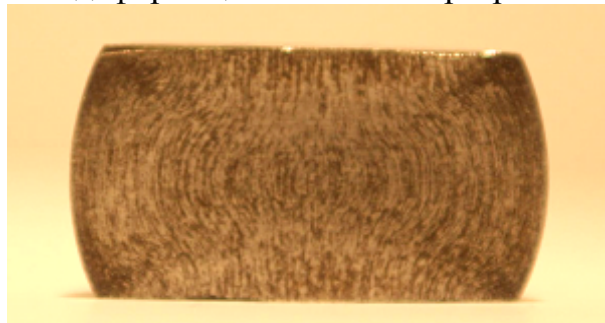


Рис. 1. «Осадочный крест» в меридиональном сечении осажённой цилиндрической заготовки.

На начальном этапе осадки такой эффект в меридиональном сечении не наблюдается из-за незначительных сдвиговых деформаций в указанной зоне, хотя в соответствии с теорией линий скольжения [1, 2] подобное явление может иметь место. Поэтому процесс холодной осадки цилиндрической заготовки можно условно разделить на 2 фазы: